

引用格式: SHI Jiaqing, YU Bing, CHU Junwei, et al. Optical Design of a Self-calibrated Low Light Radiance Meter Based on Correlated Photons[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(12):1212002

史佳庆,俞兵,储隽伟,等. 相关光子自校准微光辐亮度计的光学设计[J]. 光子学报, 2023, 52(12):1212002

相关光子自校准微光辐亮度计的光学设计

史佳庆^{1,2}, 俞兵³, 储隽伟³, 范纪红³, 胡友勃¹, 李健军¹

(1 中国科学院合肥物质科学研究院 安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

(2 中国科学技术大学, 合肥 230026)

(3 西安应用光学研究所, 西安 710065)

摘要:为满足气候监测、微光辐射计量、单光子计量等定量应用需求,设计了基于相关光子自校准的紧凑型三通道微光辐亮度计,其光谱范围为 460~1 550 nm,辐亮度测量范围为 $1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-6} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$ 。设计时考虑整机的集成化、小型化和模块化,将 8 个光谱波段集成为三通道结构。其中可见光近红外波段采用自由空间耦合,短波红外波段采用多模光纤耦合方式。通过设计优化分析,微光辐亮度计的第一、二通道的聚焦光斑满足 Si 单光子探测器光敏面 300 μm 像元要求,第三通道的聚焦光斑满足多模光纤 62.5 μm 芯径和 0.22 数值孔径要求,三个通道的聚焦光斑均可被单光子探测器光敏面接收,满足设计目标,可为后续的工程化应用提供参考。

关键词:辐射定标;辐亮度计;光学设计;相关光子;微光

中图分类号: TP732

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235212.1212002

0 引言

卫星遥感在轨运行期间,受空间环境影响,其响应特性会发生变化,其中辐射定标精度是影响遥感卫星数据质量的重要因素。国内外普遍采用的辐射定标方法有实验室定标、星上定标系统定标和外场辐射定标,主要面临传递定标链路引入误差、星载定标设备性能衰退和月亮光谱模型本身误差等问题^[1]。新的空间遥感观测使命进一步提高了观测数据的定量化要求,光学载荷从可见光至近红外的辐射定标绝对精度要求由目前的 7%~10% 普遍提高到优于 5%,经过精确辐射定标的数据能够极大地拓展遥感应用范围。其中,微光载荷定标需要建立微光辐射标准,保证遥感观测数据具备可溯源性,因此必须研究和应用针对微光探测的辐射基准源技术。

传统的微光载荷通常采用微光级联积分球光源进行测试,北京空间机电研究所通过微光级联积分球定标微光相机,测量不确定度为 18% ($k=2$) (k 为置信因子)^[2],微光级联积分球的辐射量值溯源至传递光谱仪或者光谱辐射计,这种传递设备一般在低增益时进行绝对定标,在高增益时直接采用低增益定标系数存在一定的误差。从提高微光辐亮度计量精度的角度出发,通过客观物理效应替代实物标准器,降低由于标准器传递链引入的逐级累积误差,可以提升微光辐射测量精度^[3]。基于自发参量下转换效应 (Spontaneous Parametric Down-Conversion, SPDC)^[4-5] 进行探测器响应度的绝对定标,可实现绝对辐射观测,研制相关光子自校准的微光辐亮度计具有重要意义。2002 年,意大利和美国研究机构开展了国际上首次自发参量下转换定标量子效率比对实验^[6],随后法国国家计量院 (Institut National de Metrologie, INM)^[7]、英国国家物理实验室 (National Physical Laboratory, NPL)^[8]、美国国家标准与技术研究院 (National Institute of Standards and Technology, NIST)^[9] 开展了多对相关光子的实验研究,聚焦相关光子定标方法量子效率精度提升,但未见

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2022YFB3903100)

第一作者: 史佳庆, wsjiaqing@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 李健军, jjli@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2023-04-23; 录用日期: 2023-06-09

<http://www.photon.ac.cn>

自校准和辐射观测集成设计研究报道。中国科学院安徽光机所^[10-13]针对微光、量子计量等高精度应用需求,创新性地自校准和辐射观测一体化设计,验证相关光子定标方法实际应用的可行性。

本文针对微光辐亮度计的观测动态范围,设计了自校准与辐射观测一体化的原理样机,数值模拟了自校准模式相关光子光源的光谱辐射角度分布和光谱光子数率分布。通过对相关光子自校准的微光辐亮度计两种工作模式进行光学设计,将8个光谱波段^[14]集成为三通道式,实现辐亮度计整机的小型化集成设计,利用两种单光子探测器接收微光单光子计数信号,仪器可接收测量范围为 $1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-6} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$ 的微光辐亮度,辐亮度计具备自定标和辐射观测两种模式,两种工作模式的光路等效性提升了微光传递辐射测量精度,能够实现相关光子自校准和微光辐亮度的绝对测量。

1 基于SPDC的辐射定标方法

自发参量下转换(SPDC)是泵浦源和非线性介质相互作用产生三波混频的过程,单色泵浦光子流和量子真空噪声对非中心对称非线性晶体的综合作用,使每一个入射光子以一定概率自发地分裂为能量较低的两个光子,分别称为信号光子和空闲光子,它们在光子数率、出射方向、偏振态等具有严格相关性以及从泵浦波频率到晶格共振频率的宽范围光谱分布^[15]。当探测器探测到其中一个光子的存在,则与其对应的另一个光子也必然存在可探测且可以确定其传播方向、频率等特性,利用相关光子的时间关联特性实现自校准辐射计光电探测器的自定标。

1.1 相关光子光源制备

采用I类非共线SPDC产生相关光子,原理如图1所示。 θ 是泵浦光与晶体光轴的夹角,即相位匹配角, α 和 β 分别是信号光、空闲光与泵浦光的夹角,非线性晶体后的相关光子以泵浦光为中心各自呈圆锥形分布,形成相关光子圆环。线偏振态泵浦光(e光)以特定的相位匹配角度 θ 作用于非线性晶体,自发分裂成一对相同偏振态(o光)的信号光和空闲光。

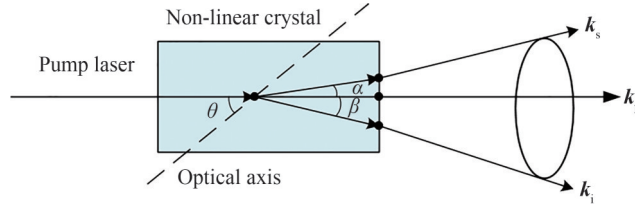


图1 SPDC相关光子产生示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SPDC correlation photon generation

SPDC过程满足相位匹配条件以及动量守恒和能量守恒条件,因此有

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i \quad (1)$$

$$\mathbf{k}_p = \mathbf{k}_s + \mathbf{k}_i \quad (2)$$

式中, ω 为光子频率, \mathbf{k} 为光子波矢,下标p、s和i分别表示泵浦光、信号光和空闲光。

信号光在晶体内部的非共线角 α 表示为

$$\cos \alpha = \frac{k_p^2 + k_s^2 - k_i^2}{2k_p k_s} = \frac{\left(\frac{n_p^e(\theta)}{\lambda_p}\right)^2 + \left(\frac{n_s^o}{\lambda_s}\right)^2 - \left(\frac{n_i^o}{\lambda_i}\right)^2}{2\frac{n_p^e(\theta)}{\lambda_p} \frac{n_s^o}{\lambda_s}} \quad (3)$$

式中, $n_p^e(\theta)$ 为相位匹配角为 θ 时泵浦e光的折射率, n_s^o 和 n_i^o 为信号光和空闲光的o光折射率, λ_s 、 λ_i 、 λ_p 分别为信号光、空闲光和泵浦光的波长。

结合式(1)~(3),模拟出355 nm激光泵浦I类负单轴偏硼酸钡(β -BaB₂O₄, BBO)晶体在不同相位匹配角时,信号光输出角度随波长的对应关系。如图2所示,随着相位匹配角减小,可见至近红外波段的相关光子光谱范围变窄;同一晶体,在共线相位匹配波长以外,相关光子信号光输出角度呈现单调递增或递减的变化趋势。

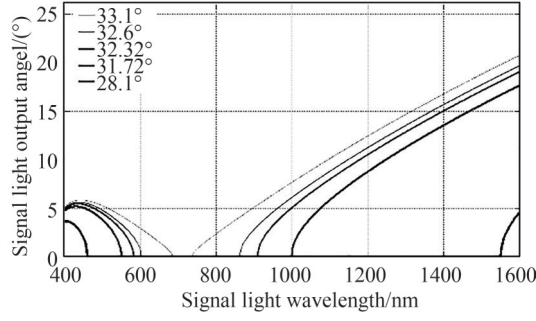


图2 不同相位匹配角下BBO晶体制备的相关光子非共线角示意图

Fig. 2 Schematic diagram of noncollinear angles of correlated photons pumped by BBO crystals under different phase matching angles

自发参量下转换产生的相关光子数率可以描述为

$$d\Phi_s = (2\pi)^4 \frac{2hcd_{\text{eff}}^2}{\epsilon_0 (n_p^e(\theta))^2} \frac{\lambda_p}{\lambda_s^5 \lambda_i^2} \int_0^X \Phi_p(x) dx d\lambda_s \quad (4)$$

式中, $d\Phi_s$ 为在光谱间隔 $d\lambda_s$ 内积分获得的信号光子数率, h 为普朗克常数, c 为光速, d_{eff} 为有效的非线性二阶系数, ϵ_0 为真空介电常数, X 为晶体长度, $\Phi_p(x)$ 为泵浦光在晶体中传输了长度 x 后的功率。

图3为模拟激光波长为355 nm,功率为100 mW,泵浦I类负单轴BBO晶体的晶体长度为2 mm时,在400~1 600 nm波段范围的参量下转换光谱光子数率分布。

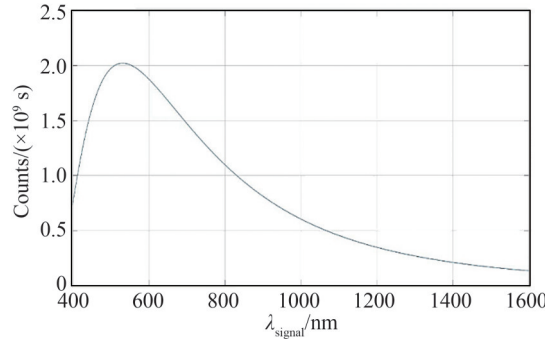


图3 相关光子光谱光子数率分布

Fig. 3 Spectral photon rate distribution of correlated photons

1.2 相关光子自校准光谱辐亮度测量原理

利用自发参量下转换原理制备相关光子及其特性实现自定标过程如图4所示。通过两个光电探测器分别接收信号光子和空闲光子,将光脉冲转化为电脉冲,分别由计数器计数并输出记数值分别为

$$M_1 = \eta_1 \cdot N_1 \quad (5)$$

$$M_2 = \eta_2 \cdot N_2 \quad (6)$$

式中, η_1 、 η_2 分别是探测器1和2的量子效率, N_1 和 N_2 分别是到达探测器1和2的平均光子数。

由于相关光子成对出现,而探测器存在死时间,无法探测到所有产生的相关光子,因此通过符合通道计数得到,两个探测器同时探测到相关光子计数的概率为

$$M_c = \eta_1 \eta_2 \cdot N_c \quad (7)$$

根据SPDC原理,晶体产生成对相关光子得

$$N_1 = N_2 = N_c \quad (8)$$

联合式(5)~(8),可得到探测器1和2的绝对量子效率分别为

$$\eta_1 = M_c / M_2 \quad (9)$$

$$\eta_2 = M_c / M_1 \quad (10)$$

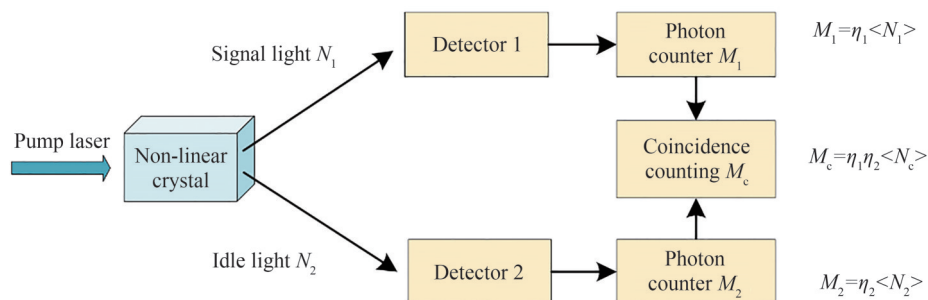


图4 SPDC定标单光子探测器绝对量子效率原理

Fig. 4 Schematic diagram of absolute quantum efficiency calibration of single photon detectors based on SPDC

根据式(9)、(10)可以看出量子效率的定标结果只决定于两个通道的光子计数和符合通道的计数值,两个探测器之间不相关,此种定标方法实现了自身绝对、不需要外部标准传递的绝对定标过程^[16-17]。

在绝对辐射测量模式下,单光子探测器输出的信号脉冲数与有效接收辐射通量关系表示为

$$N = \frac{\Phi \cdot \lambda}{hc} \cdot \eta \quad (11)$$

式中, N 是光子计数器输出的脉冲数, Φ 是有效接收的辐射通量, λ 是入射光波长, η 是光子计数探测器的绝对量子效率。

单光子探测器有效接收的辐射通量 Φ 与入射光谱辐亮度和光路参数的关系可以表示为

$$\Phi = L \cdot \Omega \cdot A \cdot \tau \quad (12)$$

式中, L 是入瞳辐亮度, Ω 为光路接收的立体角, A 是视场有效面积, τ 是光路传输的衰减系数。由式(11)和(12)得

$$L = \frac{N}{\eta \cdot \tau} \cdot \frac{hc}{\Omega \cdot A \cdot \lambda} \quad (13)$$

$\eta \cdot \tau$ 利用相关光子方法测量得到, Ω 通过对仪器视场测量得到, A 通过通量比较方法测量得到, λ 通过仪器带宽测量得到, N 通过观测目标光源测量得到。由此获得辐射观测模式下的辐亮度值。

2 微光辐亮度计总体方案

紧凑型微光辐亮度计可观测的波段范围为460~1 550 nm,一共包含3个光谱通道,同时具备辐射观测模式和相关光子自校准模式,总体设计方案如图5所示。辐亮度计的主要组成部分包括泵浦光出射模块、相关光子产生模块、自校准和辐射观测复用模块、八字型滤光片模块、光子计数与符合计数测量模块等光电模块,此外还包含结构、供电和温度控制等辅助单元。

355 nm泵浦激光经格兰泰勒棱镜、半波片后,产生偏振方向可调节的线偏振光,经焦距为150 mm的透镜在BBO晶体中心会聚成近100 μm 的光斑,利用配置的4块非线性晶体的自发参量下转换过程,产生460~1 550 nm波段的相关光子。基于相关光子自校准原理的优势,在自校准模式下测量通道的探测效率,在观测模式下依据通道探测效率和输出光子计数率反演目标的辐亮度,自校准和辐射观测模式通过扫描镜实现光路切换,最大限度地保证两种模式下辐射传输路径的等效性和通道量子效率校准结果的准确性,实现绝对光谱辐亮度测量。三通道光子计数和符合探测模块实现3个通道8个波段的相关光子计数和绝对量子效率自校准。

在355 nm激光器与非线性晶体之间放置格兰泰勒棱镜、半波片和聚焦透镜,光路经过模式切换扫描镜和离轴抛物面镜后进入八字形滤光片模块,八字滤光片模块由两块分色片和一块截止滤光片组成,各元件在光路中的作用如表1所示。

根据微光辐亮度计光机系统确定的观测几何和单光子探测器电子学相关参数进行初步设计,对观测辐亮度范围进行了估算,如表2所示。

三通道辐亮度计的工作过程是:在自校准模式下,泵浦光入射非线性晶体产生相关光子,经过扫描镜反

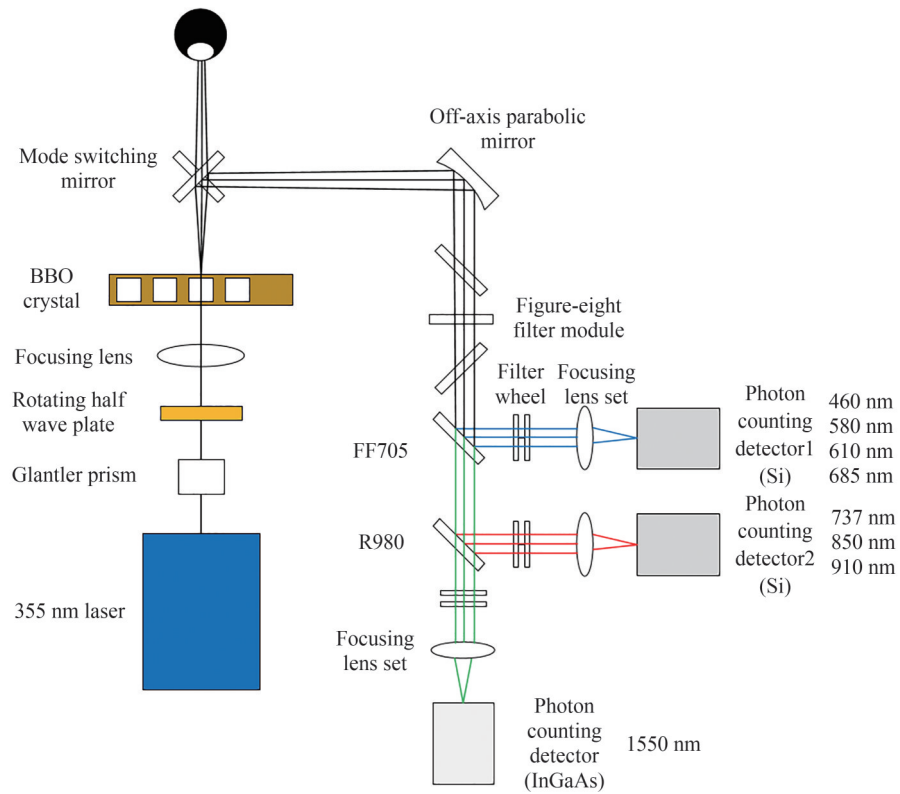


图5 紧凑型微光辐亮度计总体设计方案

Fig. 5 Overall design scheme of compact low light radiance meter

表1 辐亮度计部分元件功能

Table 1 Functions of some components of radiance meter

Element	Main function
Glantler prism	Adjust the pump laser polarization state to linear polarization
Half-wave plate	Enables/disables parametric downconversion
Off-axis parabolic mirror	Reduce the influence of color difference and uncertainty and improve the equivalence
Filter module	Filter pump light and improve the signal-to-noise ratio of correlated photon measurement

表2 微光辐亮度计观测辐亮度范围估算

Table 2 Estimation of observed radiance range of low light radiance meter

Parameter	Technical index	
Wavelength range	460 ~1 550 nm	
Observation bandwidth	<12 nm	
Observed field of view	±1°	
Field aperture	100 μm	
Transmittance of optical system	0.15	
Si APD	Dark count rate	<500/s
	Saturation count rate	20 M/s
	Quantum efficiency	69%@685 nm
InGaAs APD	Dark count rate	<1 000/s
	Saturation count rate	1 M/s
	Quantum efficiency	10%@1 550 nm
Target radiance	$1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-6} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$	

射和离轴抛物面镜准直后进入3个光谱通道,传输至Si和InGaAs单光子探测器,获得8路相关光子计数和4对符合计数;辐射观测模式通过扫描镜切换,目标辐射通过扫描镜反射经过相同光路测量模块后进入单光子探测器,获取辐亮度值。根据辐亮度计光路原理及模块组成,结合紧凑型小型化设计思路,给出如表3所示微光辐亮度计主要性能参数。

表3 微光辐亮度计主要性能参数
Table 3 Main performance parameters of low light radiance meter

Main parameter	Index requirement
Operating wavelength range	460~1 550 nm
Pump laser wavelength	355 nm
Crystal type	BBO
Coincidence band	460 nm/1550 nm, 580 nm/910 nm, 610 nm/850 nm, 685 nm/737 nm
Working mode	Self-calibration model and radiation observation model
Observation field of view	$\pm 1^\circ$
Spectral radiance measurement range	$1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-6} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$
Measurement uncertainty	8% ($k=2$)

3 三通道辐亮度计光学设计

使用Zemax软件对三通道辐亮度计进行整体设计,利用多重结构可以对辐射计进行整体评估,设置多个结构分支,使用相关操作数分别对各个支路进行单独的操作设置。光学设计需要保证在自校准模式和辐射观测模式下,3个通道探测器像面处的弥散斑小于探测器的光敏面大小,在自校准模式下,相关光子最大发散角为 $\pm 5^\circ$ @1 550 nm,辐射观测模式观测视场角为 $\pm 1^\circ$,第一通道包含460 nm、580 nm、610 nm、685 nm四个波段,第二通道包含737 nm、850 nm、910 nm三个波段,第三通道只有1 550 nm波段,探测器选用Si单光子探测器和InGaAs单光子探测器。

3.1 第一、二通道设计

第一、二通道采用自由空间耦合方式,通过聚焦透镜组将平行光耦合进Si单光子探测器光敏面。相关光子经八字滤光片模块后,通过分色片选择460 nm、580 nm、610 nm、685 nm和737 nm、850 nm、910 nm波段的光,经过带通滤光片和聚焦透镜组耦合至Si单光子探测器的光敏面。第一、二通道的自校准模式和辐射观测模式光路三维布局如图6所示。

第一、二通道采用伽利略式缩束光路,实现平行光束的1:1.5缩束,如图7所示,包含一个正透镜和一个负透镜,两个透镜之间的距离等于它们的焦距之差,相比开普勒式,伽利略式设计结构更为紧凑,保持光束

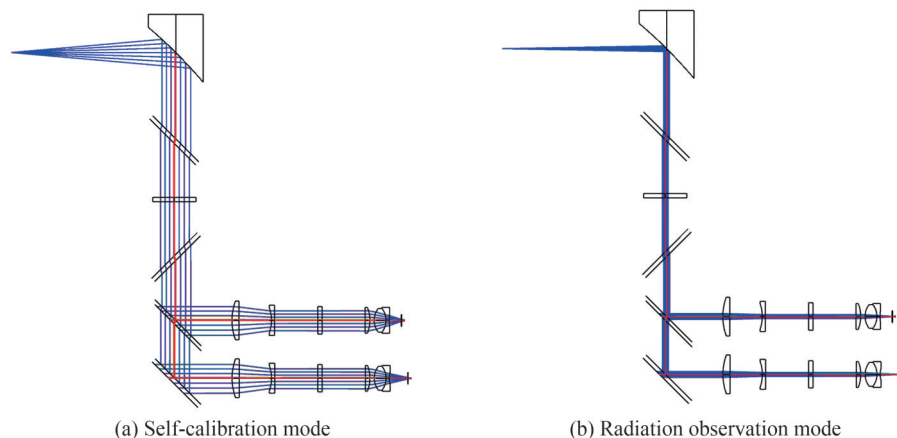


图6 第一、二通道光路三维图
Fig. 6 3D diagram of the first and second channel optical path

方向,系统长度更短。伽利略式设计还可用于最小化球面像差,减少光束焦点沿光轴移动^[18]。对于正球面透镜,与入射到透镜中心附近的平行光线相比,入射到透镜边缘的平行光线会聚焦到光轴上更靠近透镜的一点,而负球面透镜具有相反的效果,因此伽利略式设计中的负透镜可用于抵消由正透镜引入的部分球面像差,得到较高的波前质量。

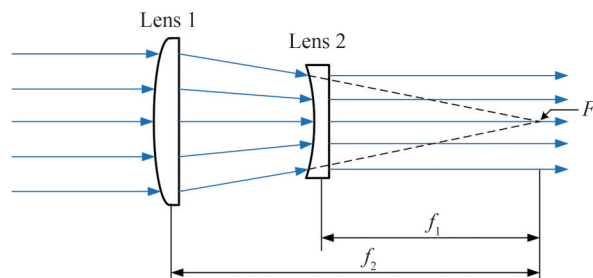


图7 伽利略式缩束结构
Fig. 7 Galilean shrink beam structure

第一、二通道会聚光路使用单透镜和双胶合透镜组合的结构,通过ZEMAX操作数约束光线方向、均方根(Root Mean Square,RMS)光斑半径、正透镜最小边缘厚度、最大中心厚度和负透镜的最小中心厚度、最大边缘厚度以及透镜之间的距离,保证各个厚度满足透镜的边缘最小厚度和中心最小厚度。优化后的耦合透镜组结构如图8所示。

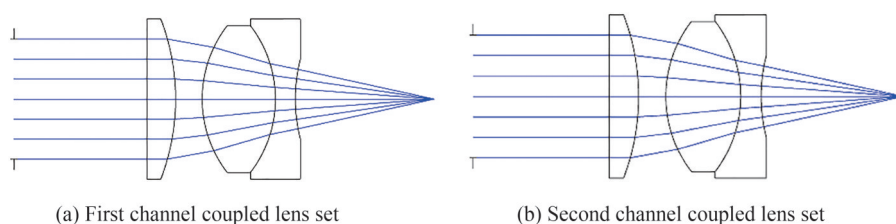


图8 第一、二通道耦合透镜组结构
Fig. 8 Structure of the first and second channel coupled lens set

根据生产频率和生产成本,初步选取冕玻璃H-ZPK1A和火石玻璃H-ZF52A和H-ZF88,综合考虑玻璃的加工难易程度以及所需探测波段的透过率,选择冕玻璃H-ZPK1A和火石玻璃H-ZF52A。H-ZF52A和H-ZF88玻璃的不同波段透过率参数如表4、5所示,H-ZF88玻璃在460~500 nm之间的透过率低于95%,其中460 nm波段透过率仅有88%,H-ZF52A玻璃在460~1 550 nm之间的透过率均大于95%。透镜参数如表6、7所示。

表4 H-ZF52A 玻璃透过率 Table 4 H-ZF52A glass transmission			表5 H-ZF88 玻璃透过率 Table 5 H-ZF88 glass transmission		
Wavelength/nm	Transmission	Thickness/mm	Wavelength/nm	Transmission	Thickness/mm
460	0.953	10	460	0.886	10
480	0.966	10	480	0.921	10
550	0.989	10	550	0.979	10
600	0.993	10	600	0.989	10
700	0.996	10	700	0.993	10
850	0.998	10	850	0.995	10
900	0.998	10	900	0.996	10
1000	0.998	10	1000	0.998	10
1400	0.998	10	1400	0.998	10
1600	0.998	10	1600	0.996	10

表 6 第一通道会聚光路参数
Table 6 First channel focusing optical path parameter

Surface number	Surface type	Radius of curvature/mm	Surface thickness/mm	Material	Half-height of aperture/mm
1	Sphere	INFINITY	4.3	H-ZPK1A	12
2	Sphere	-31.947	4	AIR	12
3	Sphere	18.000	11	H-ZPK1A	11
4	Sphere	18.000	3	H-ZF52A	11
5	Sphere	49.304	11.175	AIR	6

表 7 第二通道会聚光路参数
Table 7 Second channel focusing optical path parameter

Surface number	Surface type	Radius of curvature/mm	Surface thickness/mm	Material	Half-height of aperture/mm
1	Sphere	INFINITY	4.3	H-LAF52	12
2	Sphere	-31.344	4	AIR	12
3	Sphere	18.000	11	H-ZPK1A	11
4	Sphere	18.000	3	H-ZF52A	11
5	Sphere	20.927	17.175	AIR	6

通过 ZEMAX 设计光路仿真,视场(定义物高)为-0.05 mm、0 mm、0.05 mm,第一通道和第二通道在自校准模式和目标观测模式下的像面光斑全视场点列图如图 9、10 所示。

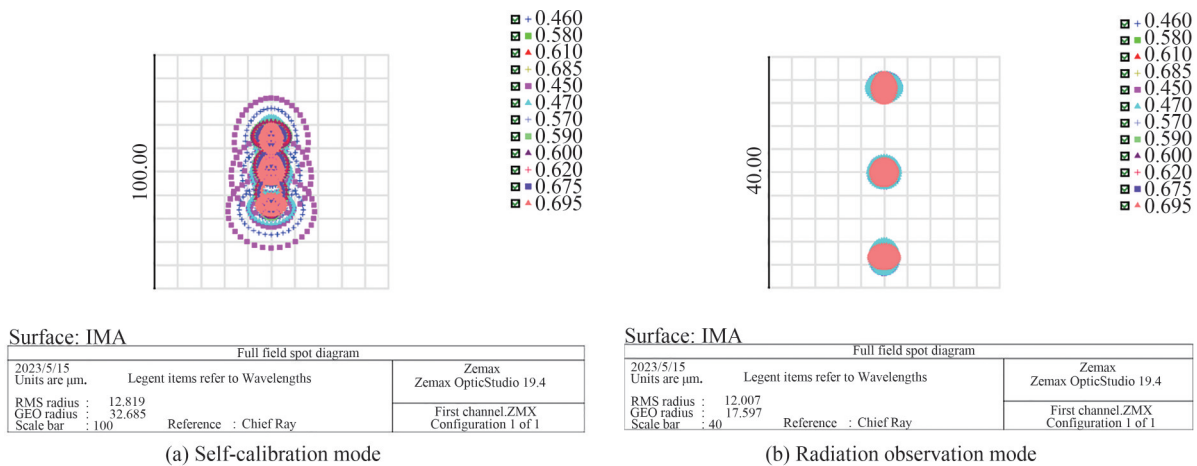


图 9 第一通道像面光斑全视场点列图
Fig. 9 Full field of view spot diagram of image surface light spot in first channel

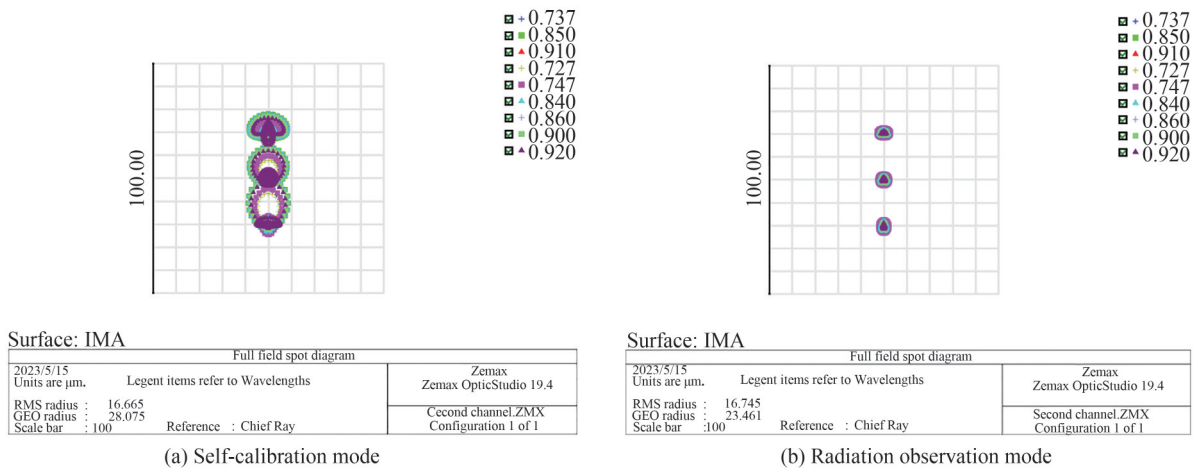


图 10 第二通道像面光斑全视场点列图
Fig.10 Full field of view spot diagram of image surface light spot in channel 2

根据像面光斑全视场点列图可知,在自校准模式下,第一通道像面全视场弥散斑最大几何直径为65.37 μm ,第二通道像面全视场弥散斑最大几何直径为56.15 μm ;在辐射观测模式下,第一通道像面全视场弥散斑最大几何直径为35.19 μm ,第二通道像面全视场弥散斑最大几何直径为46.92 μm 。两种工作模式下,两个通道的像面弥散斑最大几何直径均小于Si单光子探测器光敏面直径,满足Si单光子探测器直径300 μm 大小的要求。

在ZEMAX中利用误差数据编辑器进行各表面、元件的误差数据分析,公差参数设置和第一、二通道的公差分析结果如表8~10所示。

表8 公差设置参数

Table 8 Tolerance setting parameters table

Tolerance parameter	Set value
Radius of curvature	2 aperture
Surface thickness	0.02 mm
S + A irregularity	0.2 aperture
Surface/component eccentricity	0.02 mm
Surface/element tilt	0.02°
Refractive index	0.001%
Abbe	0.05%

表9 一通道公差分析结果

Table 9 Tolerance analysis results of first channel

Percentage	RMS radius/ μm
98%>	7.20
90%>	6.27
80%>	5.79
50%>	5.07
20%>	4.57
10%>	4.41
2%>	4.14

表10 二通道公差分析结果

Table 10 Tolerance analysis results of channel 2

Percentage	RMS radius / μm
98%>	8.91
90%>	7.08
80%>	6.17
50%>	4.79
20%>	3.70
10%>	3.37
2%>	2.92

通过公差评价分析,第一通道全视场弥散斑直径最小值为59.94 μm ,最大值为97.34 μm ,全视场弥散斑大小有90%的概率小于探测器光敏面像元大小的1/3;第二通道全视场弥散斑直径最小值为51.44 μm ,最大值为90.64 μm ,全视场弥散斑大小有90%的概率小于探测器光敏面像元大小的1/4,满足设计需求。

3.2 第三通道设计

第三通道采用光纤耦合方式,使用InGaAs单光子探测器接收相关光子。光纤耦合一般将光纤放置在耦合透镜的焦点位置,相关光子或目标光经光纤耦合透镜折射后聚焦到透镜焦点位置,在满足光纤数值孔径的情况下,将相关光子全部耦合到光纤内部,光纤的另外一端与单光子探测器的光敏面连接,保证相关光子最大效率通过光纤传输并耦合进单光子探测器。

光纤耦合设计路线如图11所示。相关光子光束经过缩束后通过耦合透镜组聚焦进多模光纤中,多模光纤的芯径为62.5 μm ,数值孔径为0.22。通过ZEMAX优化设计选择最合适的透镜形态,减小光斑直径,增大耦合效率。

通过聚焦透镜聚焦后,聚焦光斑的最大直径尺寸应小于光纤芯径尺寸,且聚焦后光线的发散角需要小

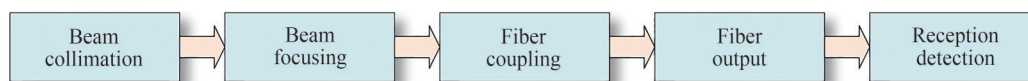


图11 光纤耦合流程

Fig. 11 Fiber coupling flow chart

于光纤的数值孔径(Numerical Aperture, NA)值,光线的入射角要在光纤的最大接收角范围内^[19],光纤耦合几何条件为

$$d < d_{\text{fiber}} \quad (12)$$

$$\theta < \theta_{\text{max}} = 2 \arcsin(\text{NA}_{\text{fiber}}) \quad (13)$$

式中, d 表示聚焦光束在光纤入射端面处的光斑最大直径, d_{fiber} 表示光纤的芯径大小, θ 表示输入光束发散全角, NA_{fiber} 表示光纤的数值孔径大小。光纤传输示意图如图12所示。

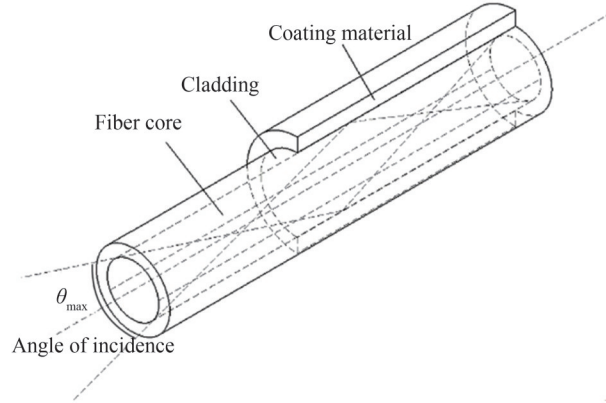


图12 光纤传输示意图

Fig. 12 Optical fiber transmission diagram

第三通道自校准模式和辐射观测模式光路三维布局图如图13所示。

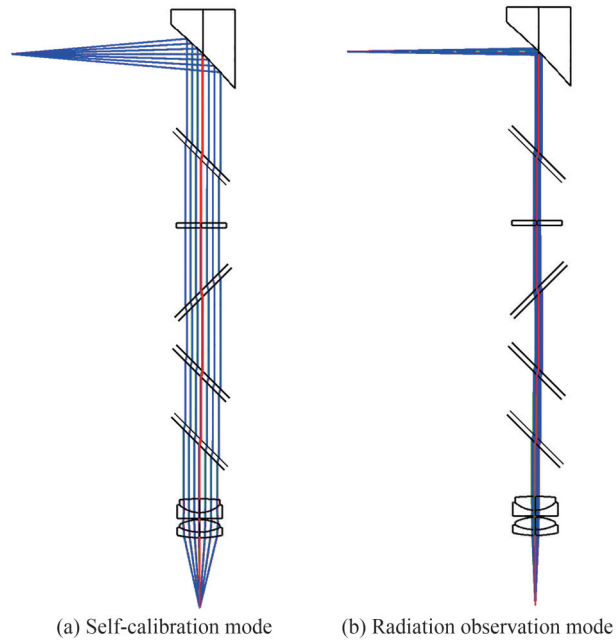


图13 第三通道ZEMAX光路三维图

Fig. 13 3D diagram of the third channel ZEMAX optical path

第三通道透镜组参数如表11所示。

第三通道像面光斑全视场点列图如图14所示。

根据像面点列图可知,在自校准模式下,全视场光斑最大几何直径为 $42.98 \mu\text{m}$;在辐射观测模式下,全视场光斑最大几何直径为 $42.56 \mu\text{m}$,像面的数值孔径 NA 值为 0.21,满足多模光纤半径 $62.5 \mu\text{m}$ 和数值孔径 NA 值 0.22 的设计要求。

公差评价分析结果如表12所示,第三通道全视场弥散斑直径最小值为 $42.64 \mu\text{m}$,最大值为 $52.12 \mu\text{m}$,全

表 11 第三通道会聚光路参数表
Table 11 Third channel focusing optical path parameter table

Surface number	Surface type	Radius of curvature/mm	Surface thickness/mm	Material	Half-height of aperture/mm
1	Sphere	179.703	11	H-ZPK1A	16
2	Sphere	-24.030	4.5	H-ZF52A	16
3	Sphere	INFINITY	1	AIR	18
4	Sphere	35.021	10	H-ZPK1A	16
5	Sphere	-35.820	4.5	H-ZF52A	16
6	Sphere	-81.006	55.889	AIR	18

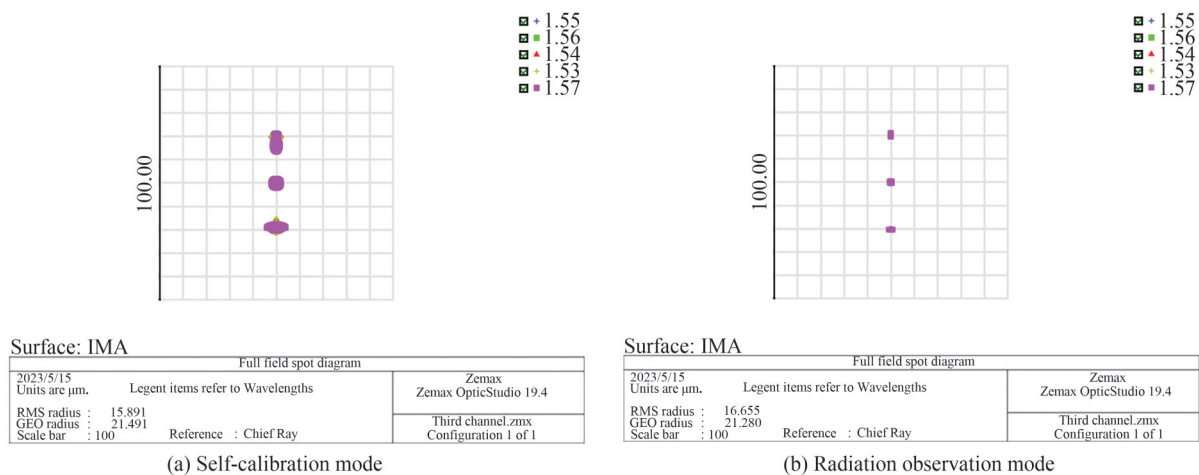


图 14 第三通道像面光斑全视场点列图

Fig. 14 Full field of view spot diagram of image surface light spot in channel 3

视场弥散斑大小有 90% 的概率小于 48.18 μm, 满足设计需求。

表 12 第三通道公差分析结果
Table 12 Tolerance analysis results of channel 3

Percentage	RMS radius/μm
98%>	3.44
90%>	2.60
80%>	2.20
50%>	1.64
20%>	1.35
10%>	1.25
2%>	1.15

通过对微光辐亮度计三个通道光路的设计优化和评价分析,结合由视场引起的偏心距离,各个通道的像面全视场弥散斑直径最优值和最差值如表 13 所示。其中,第一通道像面全视场弥散斑直径有 90% 的概

表 13 三个通道像面光斑直径极值
Table 13 Extreme spot diameters in the image plane of three channels

Channel	Observation band/nm	Optimal value of light spot in image plane/μm	Worst value of light spot in image surface/μm	Design index/μm
1	460~685	59.94	97.34	300
2	737~910	51.44	90.64	300
3	1 550	42.64	52.12	62.5

率优于 $77.91\ \mu\text{m}$, 第二通道像面光斑直径有 90% 的概率优于 $70.31\ \mu\text{m}$, 第三通道像面光斑直径有 90% 的概率优于 $48.18\ \mu\text{m}$, 各通道设计均满足设计指标要求。

4 结论

本文针对微光辐亮度计的观测动态范围, 设计了自校准与辐射观测一体化的原理样机, 进行了基于相关光子自发参量下转换的紧凑型三通道微光辐亮度计的光学设计, 辐亮度计由泵浦光出射模块、相关光子产生模块、自校准和辐射观测复用模块、八字滤光片模块、三通道光子计数与符合计数测量模块等组成。第一、二通道采用伽利略式缩束光路, 通过聚焦透镜组在自由空间内将光耦合进 Si 单光子探测器光敏面, 一、二通道像面全视场弥散斑最大几何直径分别为 $65.37\ \mu\text{m}$ 和 $56.15\ \mu\text{m}$, 均小于 Si 单光子探测器光敏面直径, 光子光斑可全部进入探测器光敏面。第三通道通过多模光纤耦合方式将光耦合进 InGaAs 单光子探测器, 在满足多模光纤数值孔径的前提下, 全视场光斑最大几何直径为 $42.982\ \mu\text{m}$, 满足多模光纤芯径要求。后续工作将从光机结构方面进行优化设计, 进一步提高微光辐亮度计的测量精度。

参考文献

- [1] HU Shensen, MA Shuo, JIANG Jun, et al. Research progress in radiometric calibration and data application of spaceborne low-light imager[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(15): 1500001.
胡申森, 马烁, 江军, 等. 星载微光成像仪辐射定标与资料应用研究进展[J]. *光学学报*, 2021, 41(15): 1500001.
- [2] LI Yongqiang, ZHAO Zhanping, XU Pengmei, et al. Radiometric calibration of low-light camera with large dynamic range [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(S1): 84-88.
李永强, 赵占平, 徐彭梅, 等. 大动态范围微光相机的辐射定标[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(S1): 84-88.
- [3] BAI Mili, LI Jianjun, GAO Dongyang, et al. Experimental study on comparison between two-channel self-calibrating radiometer and radiance standard detector[J]. *Chinese Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2019, 14(4): 296-302.
白米粒, 李健军, 高冬阳, 等. 双通道自校准辐射计与辐亮度标准探测器的比对实验研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2019, 14(4): 296-302.
- [4] TANG Qi, LI Jianjun, LI Chen, et al. Opto-mechanical design of a self-calibrated radiation reference source principle prototype based on parametric down-conversion[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(2): 0222002.
汤琪, 李健军, 李琛, 等. 基于参量下转换自校准辐射基准源原理样机的光机设计[J]. *光子学报*, 2019, 48(2): 0222002.
- [5] DANIEL R, GUIDO, ALFRED B, et al. Study of the effect of pump focusing on the performance of ghost imaging and ghost diffraction, based on spontaneous parametric downconversion[J]. *Optics Communications*, 2011, 285(6): 1269-1274.
- [6] MIGDALL A, CASTELLETTO S, DEDIOVANNI I, et al. Intercomparison of a correlated-photon-based method to measure detector quantum efficiency[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(15): 2914-2922.
- [7] GHAZI-BELLOUATI A, RAZET A, BASTIE J, et al. Detector calibration at INM using a correlated photons source [J]. *The European Physical Journal Applied Physics*, 2006, 35(3): 211-216.
- [8] CHEUNG J, CHUNNILALL C, THOMAS P, et al. Photon-counting: measurement challenges [C]. *SPIE*, 2007, 6583: 65830.
- [9] GAO D, XIA M, LI J, et al. Absolute quantum efficiency calibration of analog detectors with twin photon current [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2017, 22(4): 411-416.
- [10] XIA Maopeng, LI Jianjun, GAO Dongyang, et al. Calibration method of InSb analog detector based on multi-mode correlation of correlated photons[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(24): 123-129.
夏茂鹏, 李健军, 高冬阳, 等. 基于相关光子多模式相关性的 InSb 模拟探测器定标方法[J]. *物理学报*, 2015, 64(24): 123-129.
- [11] GAO Dongyang, HU Youbo, LIU Yan, et al. Calibration of photoelectric detection efficiency of two-channel self-calibrating spectral radiation source[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 326-333.
高冬阳, 胡友勃, 刘岩, 等. 双通道自校准光谱辐射源光电探测效率的定标[J]. *光学学报*, 2016, 36(11): 326-333.
- [12] ZHENG X, XIA M, ZHAI W, et al. SI traceable solar spectral irradiance measurement based on a quantum benchmark: a prototype design[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(9): 1454.
- [13] YIN L, LI J, ZHAI W, et al. Analysis of the spatial properties of correlated photon in collinear phase-matching[J]. *Photonics*, 2021, 8(1): 12.
- [14] YOUBO H, JIANJUN L, DONGYANG G, et al. Absolute radiance measurement based on correlated photons calibration [J]. *The European Physical Journal D*, 2020, 74(1): 100294.
- [15] GAO Dongyang. Theoretical analysis and experimental study on spectral radiation characteristics of spontaneous parametric

- downconversion[D]. Hefei: Anhui University, 2015.
高冬阳. 自发参量下转换的光谱辐射特性理论分析与实验研究[D]. 合肥:安徽大学, 2015.
- [16] SHI Xueshun, LIU Changming, ZHAO Kun, et al. Quantum efficiency measurement system of single photon detector based on correlation photons[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(3): 0304001.
史学舜, 刘长明, 赵坤, 等. 基于相关光子的单光子探测器量子效率测量系统[J]. *光子学报*, 2017, 46(3): 0304001.
- [17] LU Yunjun, LI Jianjun, ZHANG Wei, et al. A new absolute calibration method for infrared radiance[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2010, 30(5): 1315-1320.
卢云君, 李健军, 张伟, 等. 一种新型的红外辐亮度绝对定标方法研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(5): 1315-1320.
- [18] XUE Lu. Design of wide field of view high resolution multi-scale and multi-aperture optical computational imaging system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
薛露. 宽视场高分辨率多尺度多孔径光学计算成像系统设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018.
- [19] CHEN Mingliang, HAO Fayang, CAI Meng, et al. Design of infrared wide-band coupling optical system based on fiberend cap[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(5): 278-283.
陈明亮, 郝培育, 蔡猛, 等. 基于光纤端帽的红外宽波段耦合光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(5): 278-283.

Optical Design of a Self-calibrated Low Light Radiance Meter Based on Correlated Photons

SHI Jiaqing^{1,2}, YU Bing³, CHU Junwei³, FAN Jihong³, HU Youbo¹, LI Jianjun¹

(1 *Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

(2 *University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

(3 *Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China*)

Abstract: The high-precision self-calibration radiation reference source is currently the research focus of satellite remote sensing calibration. In order to meet the requirements of quantitative applications such as climate monitoring, low-light radiation metering and single photon source radiance measurement, in view of the application requirements and technical requirements of visible to near infrared low-light radiometer, a compact three-channel low-light radiance meter based on correlated photon self-calibration is designed. This design method can improve the measurement accuracy of low light irradiance by using objective physical effect instead of physical standard, reducing the cumulative error caused by standard transfer chain. The absolute calibration of the detector responsivity can be achieved by the spontaneous parameter down-conversion effect, and the absolute radiation observation can be achieved without relying on the external reference. Based on this study, combined with the special application requirements of radiance meter, a numerical model of spectral rate and geometric transmission characteristics of wide spectrum correlated photons is established, and two basic operating modes of self-calibration and radiation observation are determined. The interaction between 355 nm pump source and nonlinear medium generates three-wave mixing, and the correlated photons are generated by class I non-collinear spontaneous parametric downconversion, the combined effect of monochromatic pump photon flow and quantum vacuum noise on non-centrosymmetric nonlinear crystal makes each incident photon spontaneously split into two photons with lower energy with a certain probability, called signal photons and idle photons respectively, they have a wide spectrum distribution from pump wave frequency to lattice resonance frequency. Correlated photon source has the technical characteristics of time and space correlation, natural wide spectrum and absolute reproducibility, so it has high absolute accuracy. Integrated design of self-calibration and radiation observation can monitor and correct changes in response characteristics in real time, maintain long-term stability of response characteristics, and improve traceability and accuracy of observation data. This design method solve the key technologies such as preparation and value transfer of correlated photon sources, suppression of pump stray light, high precision and high efficiency coupling of correlated photons, UV radiation resistance of space single-photon detectors, packaging reinforcement technology of space single-photon detectors, self-calibration and integrated design of radiation observation. The spectral measurement

range of the low-light radiance meter is from 460 nm to 1 550 nm, the measurement range of radiance is $1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-6} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$. In the design, the integration, miniaturization and modularization of the whole system are considered, and the eight spectral bands are integrated into a three-channel structure, solving the preparation of wide spectrum dependent photon source, optical multiplexing of calibration optical path, radiation measurement, high precision coincidence measurement and full optical path calibration of radiance meter, and achieving high precision radiation observation from visible to near infrared and periodic self-calibration research targets. In the self-calibration mode, the multiplex optical path module periodically introduces the spontaneous parametric down-conversion correlated photons, and the photon counting and coincidence detection module are used to calibrate the absolute quantum efficiency of the three channels. In the radiation observation mode, the multiplex optical path module introduces the low-light level target radiation and obtains the absolute spectral radiance of the observation target in the band of 460~1 550 nm at the same time. The calibration coefficient obtained by the self-calibration mode is used to correct the observation results. The effects of link error limited by radiation reference value transfer, optical decay of optical path and electronic decay of optical path on the measurement accuracy of microradiance are fundamentally solved. The visible near-infrared band adopts free space coupling mode and the short-wave infrared band adopts multi-mode fiber coupling mode. Through design optimization analysis, the focusing spots of the first and second channels meet the 300 μm pixel requirement of Si single photon detector, and the focusing spot of the third channel meets the 62.5 μm core diameter and 0.22 numerical aperture requirement of multi-mode fiber, all of them can be received by the detector photosensitive surface, meeting the design objectives. The method based on correlated photon calibration does not need to trace the high-precision primary standard in the laboratory and the lengthy standard transfer chain. By using the correlated photon generated in the process of parametric down-conversion, the calibration source of time, space and polarization can be obtained, and the high-precision observation of the low-light spectrum radiance from visible to near infrared band can be realized. The solution to the scientific problem of low-light observation instrument in space platform measurement can obtain higher calibration accuracy, and play an important role in climate monitoring, low-light radiation metrology, single-photon source radiance measurement and so on.

Key words: Radiometric calibration; Radiance meter; Optical design; Correlated photons; Low light

OCIS Codes: 120.4570; 300.6420; 230.5160; 080.3630; 060.2270